

## **Análisis de la difusión de comportamiento en un modelo de consumo de agua doméstica mediante simulación basada en agentes**

**José Manuel Galán Ordax<sup>1</sup>, Tomás Pérez Pinto<sup>2</sup>, Ricardo del Olmo Martínez<sup>1</sup>, Adolfo López Paredes<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Dpto. de Ingeniería Civil, Área de Organización de Empresas. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Burgos. Calle Villadiego, s/n 09001. Burgos. jmgalan@ubu.es, rdelolmo@ubu.es

<sup>2</sup> Director técnico de Aquagest. C/ Las heras s/n 47009. Valladolid. tperez@agbar.net

<sup>3</sup> Dpto. de Organización de Empresas y Comercialización e Investigación de Mercados. E.T.S. de Ingenieros Industriales de Valladolid. Pº del cauce s/n. Valladolid 47011, Valladolid. adolfo@insisoc.org

### **Resumen**

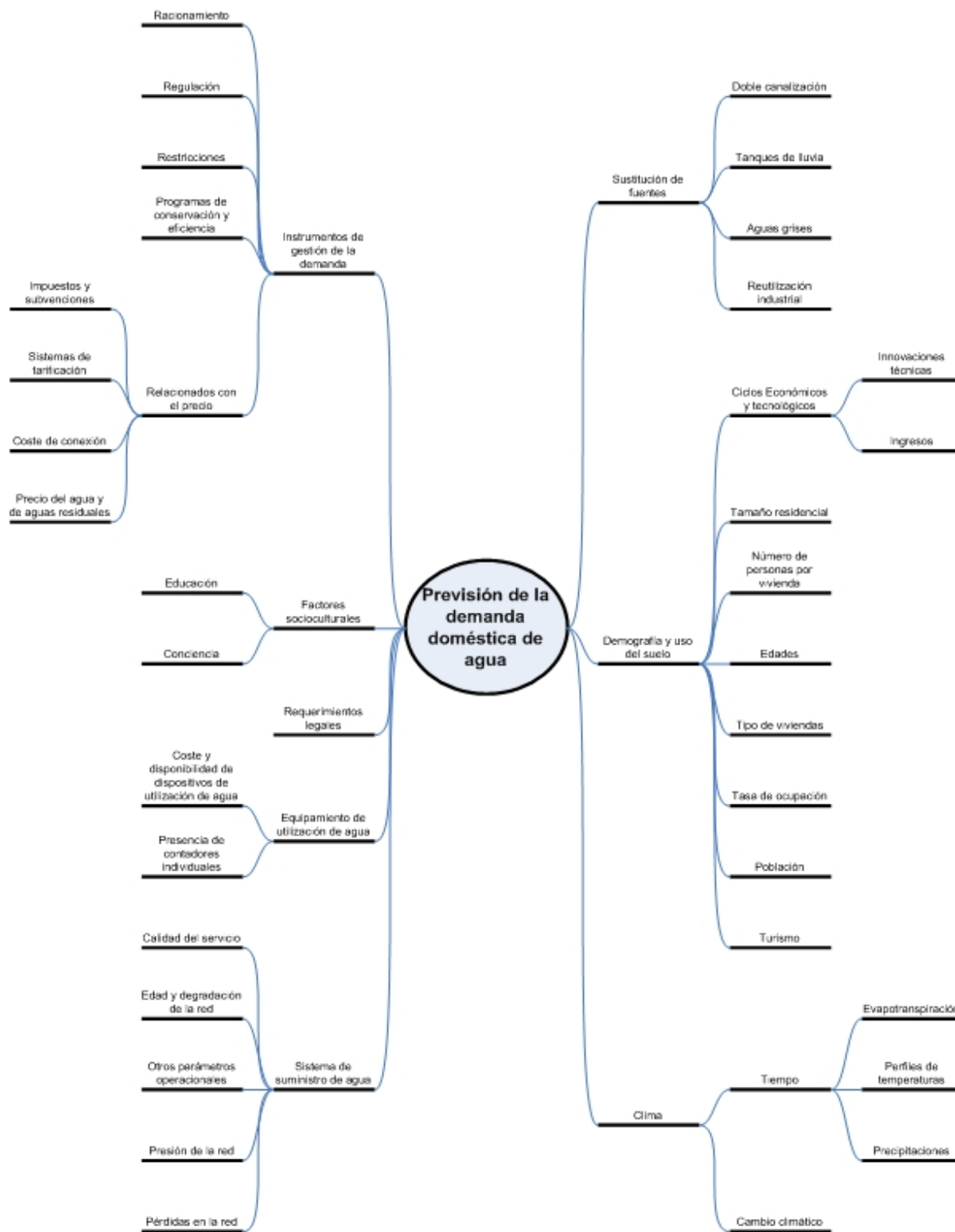
*En este trabajo comparamos mediante un modelo basado en agentes de demanda de agua doméstica parametrizado en región metropolitana de Valladolid, el efecto en diferentes escenarios de dos modelos de difusión de comportamiento y opinión respecto a la conservación del recurso alternativos: el modelo de Young-Edwards y un modelo basado en el mecanismo de endorsements. Los resultados muestran que las diferencias surgen en función de los clusters espaciales con comportamiento homogéneo en la región. Este análisis se fundamenta en los programas de gestión de la demanda que tienen como objetivo la modificación de los cambios de comportamiento de los demandantes frente a medidas basadas en un cambio tecnológico.*

**Palabras clave:** modelado basado en agentes, consumo de agua doméstica, difusión de comportamiento, simulación, gestión de agua

### **1. Introducción**

La previsión de la demanda futura es requisito indispensable para la planificación y gestión de cualquier sistema de abastecimiento. De hecho, en términos generales se puede considerar que inicialmente la estrategia esencial de cualquier sistema de gestión se ha de basar en la continua evaluación integrada de los binomios *recursos disponibles vs. necesidades* y *oferta vs. demanda* (Gistau & García-Poveda 1993, Pedregal Mateos 2004).

La predicción de la demanda de este tipo de recurso resulta una tarea compleja dado el gran abanico de factores de los que depende, muchos de los cuales se rigen por leyes de variación que no son conocidas con certeza. De hecho, si pensamos en la cantidad de variables socioeconómicas (Figura 1) con influencia en la demanda urbana del agua no es en absoluto extraño considerar ciertos niveles de incertidumbre en la predicción. Esta incertidumbre crecerá a medida que alejamos el horizonte de proyección. Según se incrementa el horizonte temporal de nuestra predicción tenemos mayores índices de variabilidad en cada uno de los factores de influencia en la demanda: los factores socio económicos, la política de ordenación del territorio, el progreso técnico, las medidas normativas, el incremento de precios en puestos o el resultado de las campañas de racionalización de uso de reparación de fugas, son algunos ejemplos representativos.



**Figura 1.** Diagrama de las principales relaciones de influencia en el consumo doméstico de agua. La figura no pretende ser exhaustiva, de hecho muchos de los pares causa/efecto a su vez están interrelacionados entre ellos, aunque se ha evitado explicitar esas relaciones por claridad del diagrama. Elaborado a partir de Opitz *et al* (1998), ADB (1999), White *et al* (2003), y Turner y White (2003).

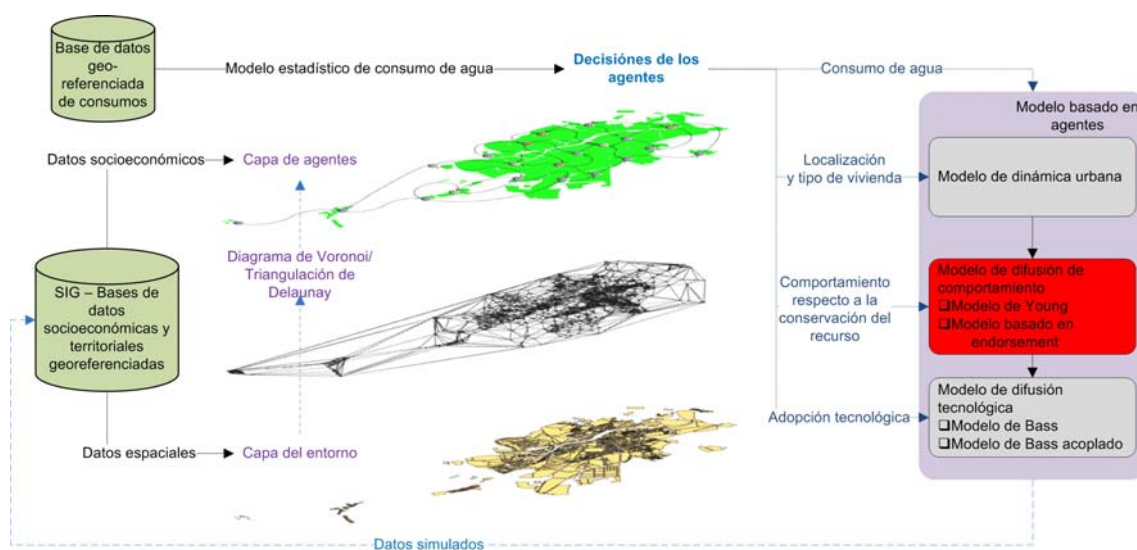
Una forma natural de analizar este tipo de sistemas, complejos y con incertidumbre creciente, es mediante análisis de escenarios (European Environment Agency 2001, SHELL 2003). Si además, la decisión individual de los actores de sistema y su interacción es relevante para determinar la dinámica entonces el modelado basado en agentes puede resultar una metodología útil para el análisis (Saurí *et al* 2003, López-Paredes *et al* 2005), especialmente para captar la dimensión social del sistema.

En este trabajo utilizamos un modelo basado en agentes de consumo de agua doméstica (Galán *et al* 2005, Galán 2007) parametrizado en la emergente región metropolitana de Valladolid para analizar mediante simulación, y en diferentes escenarios de consumo, el efecto de dos modelos alternativos de difusión de opinión y comportamiento: el modelo de Young (Edwards *et al* 2005, Young 1999) y una adaptación basada en el mecanismo de *endorsements* (Cohen 1985). Así en la siguiente sección comentamos brevemente el entorno general utilizado en las simulaciones y los escenarios propuestos, a continuación definiremos los modelos analizados y los principales resultados para acabar con las conclusiones del trabajo

## 2. Modelo general

Como herramienta de inferencia, en el simulador utilizamos un modelo basado en agentes integrado con un sistema de información geográfica (GIS) (Galán 2007) y parametrizado en la región metropolitana de Valladolid. El modelo está estructurado en submodelos que evalúan diversos aspectos con influencia en la demanda doméstica de agua en áreas metropolitanas. El entorno, importado de un GIS, representa cada uno de los bloques de viviendas en un área geográfica dada. Sobre esta capa se sitúan los agentes computacionales, cada uno representando una familia. La localización de los agentes se establece de acuerdo a la información socioeconómica de las bases de datos georeferenciadas de la región.

Esta infraestructura se utiliza para integrar cuatro submodelos diferentes: un modelo estadístico de caracterización del comportamiento del agente respecto al consumo de agua (aproximación híbrida) acoplado con un modelo basado en agentes que integra un modelo de dinámica urbana y modelos de difusión tecnológica y de difusión de opinión.



**Figura 2.** Estructura general de modelo. Se representa en rojo el modelo analizado en este trabajo.

En el proceso de parametrización, la definición de la infraestructura urbana está construida a partir del sistema de información geográfico (2006) del Centro de Información Geográfica del Ayuntamiento de Valladolid y de su Plan General de Ordenación Urbana del año 2003. Los datos económicos y sociales se han obtenido a través del registro municipal del Ayuntamiento de Valladolid del año 2006.

Los análisis de todos los modelos se han llevado a cabo en diferentes escenarios. Cada escenario está definido por las hipótesis que determinan el comportamiento del submodelo urbano, y sobre cada escenario comprobamos el efecto de diferentes medidas y parámetros en los otros submodelos que hemos integrado. El escenario 1 tiene como objetivo establecer una situación conservadora, con la que comparar el efecto de los otros dos escenarios, y analizar los modelos de difusión, tanto de comportamiento como de innovación tecnológica. En el escenario 2 se analiza el efecto en el consumo generado por un flujo constante de inmigración, y el tercer escenario evalúa el efecto de la inercia que puedan tener los precios de la vivienda en los barrios del centro de la ciudad.

### 3. Los modelos implementados de difusión de comportamiento

#### 3.1. El modelo de Young

Muchas de las normas sociales y de las formas de comportamiento habituales de los humanos en sociedad no se adoptan necesariamente de forma simultánea e inmediata, sino que con frecuencia son el resultado de un proceso de expansión gradual a través de redes sociales, conocido como proceso de difusión. En muchos casos la adopción de un tipo de comportamiento u otro está marcadamente influenciada por el número de vínculos y, por tanto, de refuerzos que tenga un individuo con un determinado tipo de comportamiento (Newman 2003).

El modelo elegido en sustitución del modelo de adaptación cultural de Benenson es precisamente un modelo reversible estocástico de un proceso de difusión que depende de la información hecha pública del recurso, en este caso el agua.

El modelo está inspirado en el modelo de sociología de difusión de la innovación de Young (1999) adoptado y adaptado por Edwards *et al* (2005). Pero en nuestro caso está ligeramente modificado para incluir mayor heterogeneidad de comportamientos individuales frente a la presión social, como detallaremos a continuación.

El modelo considera  $N$  agentes que han de decidir entre dos comportamientos a lo largo del tiempo, el comportamiento  $S$  y el comportamiento  $NS$ . Cada agente  $A$  posee una red social  $V(A)$ . En nuestro modelo la red social del agente  $A$  que ocupa la vivienda  $H_{ij}$  e construye con los agentes que ocupan las viviendas en  $U(H_{ij})$ , por tanto el número de vínculos sociales varía de un agente a otro.

La elección de adoptar un comportamiento  $S$  o  $NS$  recae en una función de utilidad que depende del comportamiento actual del agente, del comportamiento mayoritario de su red social y de la información pública. La utilidad  $v_A(S)$  y  $v_A(NS)$  de adoptar un comportamiento  $S$  o  $NS$  por parte de un agente  $A$  queda definida por las siguientes expresiones:

$$v_A(S \rightarrow S) = a \cdot V(A, S) + e_S \quad (1)$$

$$v_A(S \rightarrow NS) = b \cdot V(A, NS) \quad (2)$$

$$v_A(NS \rightarrow S) = a' \cdot V(A, S) + e_S \quad (3)$$

$$v_A(NS \rightarrow NS) = b' \cdot V(A, NS) \quad (4)$$

Donde  $V(A,S)$  y  $V(A,NS)$  son las proporciones de vecinos del agente A que han adoptado el comportamiento S o NS, y  $a$ ,  $b$ ,  $a'$  y  $b'$  son parámetros del modelo. El término exógeno  $e_S$  depende de la información sobre el recurso:

$$e_S = c_E \cdot f(InfWater) \quad (5)$$

Para tener en cuenta la variabilidad individual, al igual que en Young (1999) y en Edwards et al. (2005), se introduce una respuesta estocástica en el modelo. La elección de comportamiento dependerá por supuesto de la función de utilidad, pero el que por ejemplo  $v_A(S) > v_A(NS)$  no implica necesariamente que el agente A vaya a adoptar el comportamiento S<sup>1</sup>.

La probabilidad de adoptar el comportamiento S o NS por parte de un agente A que sigue un comportamiento S, quedará definida por:

$$P(A \text{ elige } S / S) = \frac{e^{\beta \cdot v_A(S \rightarrow S)}}{e^{\beta \cdot v_A(S \rightarrow S)} + e^{\beta \cdot v_A(S \rightarrow NS)}} \quad (6)$$

$$P(A \text{ elige } NS / S) = \frac{e^{\beta \cdot v_A(S \rightarrow NS)}}{e^{\beta \cdot v_A(S \rightarrow S)} + e^{\beta \cdot v_A(S \rightarrow NS)}} \quad (7)$$

La mayor o menor dependencia de la utilidad para la elección del comportamiento, es decir la aleatoriedad de la decisión, dependerá del parámetro  $\beta$ .

Análogamente, la probabilidad de adoptar el comportamiento S o NS por parte de un agente A que sigue un comportamiento NS, quedará definida por:

$$P(A \text{ elige } S / NS) = \frac{e^{\beta \cdot v_A(NS \rightarrow S)}}{e^{\beta \cdot v_A(NS \rightarrow S)} + e^{\beta \cdot v_A(NS \rightarrow NS)}} \quad (8)$$

$$P(A \text{ elige } NS / NS) = \frac{e^{\beta \cdot v_A(NS \rightarrow NS)}}{e^{\beta \cdot v_A(NS \rightarrow S)} + e^{\beta \cdot v_A(NS \rightarrow NS)}} \quad (9)$$

### 3.2. El modelo basado en *endorsements*

El modelo de Young-Edwards hace una hipótesis implícita de homogeneidad al considerar que todos los agentes están influenciados de la misma forma en el modelo y que es

---

<sup>1</sup> Sí que implicará que  $P(S) > P(NS)$ .

simplemente el contexto (y una función de aleatorización de la respuesta) lo que determina su comportamiento. Esta hipótesis es relajada por diferentes autores (Barthélemy 2006, Benenson & Torrens 2004) que demuestran la influencia que puede tener en el comportamiento global del sistema si incluimos diferentes proporciones de individuos influenciados por distintos motivos. Para analizar escenarios que permitan relajar esta hipótesis, incluimos una componente de comportamiento intrínseco del agente en las ecuaciones (6)-(9). De esta forma se puede evaluar el modelo mediante el modelo clásico de Young-Edwards o mediante nuestra adaptación y ver cómo de robusto es el sistema al modelo de difusión de opinión.

La representación del proceso del modelo adaptado se basa en el mecanismo de *endorsement* propuesto por Cohen (1985) y utilizado ocasionalmente en modelos de simulación social (Moss 2002, Moss 1998, Pajares *et al* 2003, Pajares *et al* 2004). En el modelo, los agentes toman decisiones de acuerdo a la percepción subjetiva de una situación, y es precisamente esa subjetividad la que se implementa mediante el mecanismo.

La información percibida por el agente es almacenada para la toma de decisiones. En el caso del modelo inicial de Young-Edwards, esta información viene dada por el comportamiento de la vecindad, la información externa del recurso y el propio estado del agente. Mientras que el peso de cada uno de los orígenes de información a la hora de tomar una decisión en este modelo es equivalente para cada uno de los agentes, en la adaptación del modelo no. Mediante la combinación de los diferentes orígenes de información con los pesos propios que da el agente a las diferentes fuentes se computa un valor subjetivo y heterogéneo (en el proceso) para cada agente.

En la adaptación se utilizan específicamente tres parámetros para caracterizar a la población: el porcentaje de población principalmente influenciada por el nivel del recurso, el porcentaje influenciado principalmente por el comportamiento de la vecindad y un porcentaje principalmente influenciado por su propio comportamiento que presenta una mayor inercia al cambio de opinión. Estos tres parámetros no son independientes, sino que su suma ha de representar la totalidad de la población. La inercia de la población al cambio es modelada por el parámetro  $c$ .

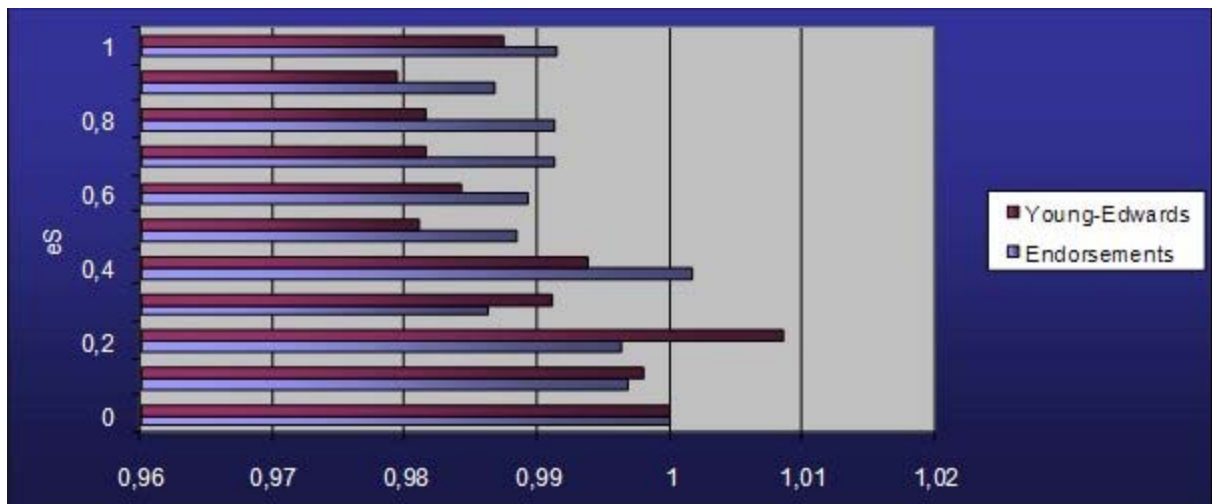
Los diferentes *endorsements* que determinan el valor subjetivo de cada agente se clasifican en función de la importancia, y por tanto influencia, que tenga para cada agente el origen de la información. De esta forma, los términos de las funciones de utilidad se modifican en función de los pesos que dé cada agente a sus fuentes (ver la ecuación (10)). Esta idea contrasta levemente con la utilización habitual del mecanismo de *endorsements* como alternativa a los sistemas basados en funciones de utilidad, puesto que en nuestro caso la complementa y no la sustituye.

$$v_A = \sum_{e_i} \psi^{e_i} \cdot \xi_i, \quad e_i \geq 0 \quad (10)$$

donde  $\xi_i$  es cada uno de los sumandos dependientes de cada origen para obtener la función de utilidad, y  $e_i$  es un valor positivo (típicamente entero) asociado a la importancia que el agente da al término  $i$ . Cuanto mayor sea el valor de  $e_i$  (índice del *endorsement*) mayor será la influencia asociada a ese término en la función de utilidad. El valor de  $\psi$  determina la importancia que tiene un índice de *endorsement* respecto al valor de otro índice.

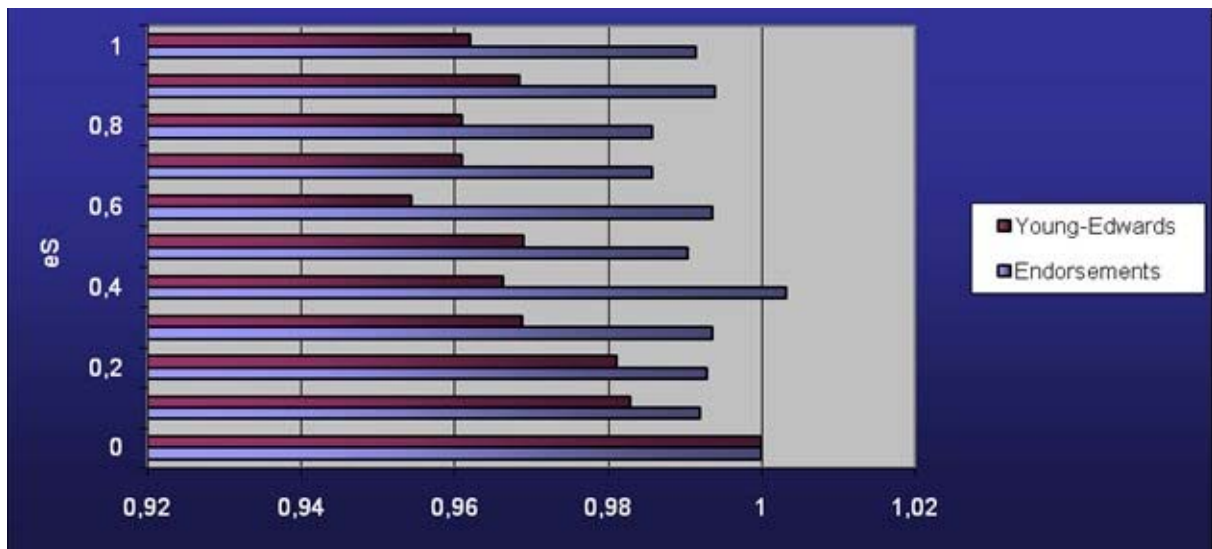
#### 4. Resultados

Haciendo la hipótesis de una distribución equilibrada en el modelo de *endorsements* se observa en la figura 3 que se encuentra la misma relación monótonica en ambos submodelos, a mayor presión mediática sobre el recurso mayor adopción de comportamiento S. Sin embargo, en el modelo de *endorsements*, el crecimiento es mucho menor que en el caso de Young. Mientras que en el modelo de Young-Edwards el parámetro actúa como un factor directo de empuje equivalente en todos los agentes del modelo, en nuestro modelo, sobre todo para valores altos de  $\Psi$ , sólo actúa de forma directa en los agentes con influencia principal global. En el resto actúa de forma indirecta a través de la influencia local que generen los influenciados globalmente que ya han adoptado el comportamiento S, por lo que el efecto es menor. Además, como muestra la figura, el valor porcentual respecto a la situación en la que el parámetro es cero, para valores bajos de  $e_s$  el modelo de *endorsements* produce un ahorro mayor que el modelo de Young-Edwards. Este crecimiento se invierte para valores altos de  $e_s$ , donde la influencia directa del parámetro en todos los agentes consigue la difusión del comportamiento S de forma más fácil que en el modelo de *endorsement* a través de la influencia indirecta y con la dificultad de cambiar comportamientos en agentes autoinflenciados.



**Figura 3.** Ahorro porcentual en el escenario 1 respecto a la situación  $e_s = 0.0$  en función del modelo de difusión del comportamiento y de  $e_s$ .

Si hacemos el análisis en el escenario 2, a pesar de que muchas de las conclusiones que obtenemos al variar  $e_s$  y el modelo de difusión de comportamiento en este escenario son muy similares a las del escenario 1, existen diferencias como muestra la figura 4.



**Figura 4.** Ahorro porcentual en el escenario 2 respecto a la situación  $e_s = 0.0$  en función del modelo de difusión del comportamiento y de  $e_s$ .

Se observa que la diferencia de ahorro entre los dos modelos es mucho más apreciable que en el primer escenario. La razón del efecto es la misma que explicaba un descenso en la proporción de comportamiento S. Mientras que el comportamiento en Young-Edwards se puede influenciar globalmente de manera sencilla, el comportamiento con el mecanismo de *endorsement* es mucho más complejo. La población autoinfluciada muestra resistencia al cambio, además se produce un efecto de clusterización entre agentes NS, por lo que se producen focos de resistencia locales importantes y se agrava el problema: simplemente el efecto externo no es capaz de batir a los otros dos efectos combinados.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se muestra la utilidad de modelado basado en agentes junto con en análisis de escenarios como herramienta para valorar el efecto de modelos sociales sobre entornos de gestión de recursos.

En el caso específico del análisis de dos modelos alternativos de difusión de opinión en un modelo de consumo de agua doméstica, los resultados de las simulaciones muestran que las diferencias entre los modelos se acentúan para altos valores de presión informativa sobre el recurso cuando existe agrupamiento espacial de población con comportamientos homogéneos.

## Agradecimientos

Este trabajo se deriva de la participación de sus autores en los proyectos de investigación financiados por el Ministerio de Educación y Ciencia con referencias DPI2004-06590 y DPI2005-05676, titulados “Integración empresarial y gestión de la cadena de suministro basada en sistemas multiagente” y “Simulador basado en agentes para la gestión del agua en espacios metropolitanos”



## Referencias

- ADB (1999). *Handbook for the Economic Analysis of Water Supply Projects*. Manila:Asian Development Bank.
- Barthélemy, O. (2006). *Untangling Scenario Components with Agent Based Modelling: an Example of Social Simulations of Water Demand Forecasts*. Manchester:Manchester Metropolitan University.
- Benenson, I.; Torrens, P.M. (2004). *Geosimulation: automata-based modeling of urban phenomena*. Chichester:John Wiley.
- Cohen, P.R. (1985). *Heuristic Reasoning about Uncertainty: an Artificial Intelligence Approach*. Boston: Pitman Advanced Publishing Program.
- Edwards, M.; Ferrand, N.; Goreaud, F.; Huet, S. (2005). "The relevance of aggregating a water consumption model cannot be disconnected from the choice of information available on the resource". *Simulation Modelling Practice and Theory*, 13:287-307.
- European Environment Agency (2001). "Scenarios as Tools for International Environmental Assessments". *Environmental issue report 24*. Luxembourg Office for Official Publications of the European Communities.
- Galán, J.M. (2007). *Evaluación integradora de políticas de agua: modelado y simulación con sociedades artificiales de agentes*. Burgos:Servicio de Publicaciones de la Universidad de Burgos.
- Galán, J.M.; Santos, J.I.; Izquierdo, S.S.; del Olmo, R.; López-Paredes, A. (2005). "Simulating complex adaptive social systems with agents: domestic water management". *Proceedings of the IV International Workshop on Practical Applications of Agents and Multiagent Systems*, pp. 79-86.
- Gistau, R.; García-Poveda, M. (1993). *Previsión de la demanda en los sistemas de abastecimiento de agua. Abastecimientos de Agua Urbanos. Estado actual y tendencias futuras*, pp. 41-64. Valencia:Universidad Politécnica de Valencia.
- López-Paredes, A.; Saurí, D.; Galán, J.M. (2005). "Urban water management with artificial societies of agents: The FIRMABAR simulator". *Simulation*, 81:189-199.
- Moss, S. (2002). "Policy analysis from first principles". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99:7267-7274.
- Moss, S. (1998). "Critical Incident Management: An Empirically Derived Computational Model". *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 1. <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/1/4/1.html>
- Newman, M.E.J. (2003). "The structure and function of complex networks". *SIAM Review*, 45:167-256.

Opitz, E.M.; Langowski, J.F.; Dziegielewski, B.; Hanna-Somers, N.A.; Willet, J.S.; Hauer, R.J. (1998). "Forecasting Urban Water Use: Models and Application". In D.D. Baumann, J.J. Boland, and W.M. Hanemann (eds.), *Urban water demand management and planning*, pp. 95-135. New York:McGraw-Hill..

Pajares, J.; Hernández, C.; López-Paredes, A. (2004). "Modelling Learning and R&D in Innovative Environments: a Cognitive Multi-Agent Approach". *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 7. <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/7/2/7.html>

Pajares, J.; López-Paredes, A.; Hernández, C. (2003). "Industry as an organization of agents: Innovation and R&D management". *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6. <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/2/7.html>

Pedregal Mateos, B. (2004). "Estimación de la Demanda de Agua Urbana en los Planes Marco: el Caso Español a la Luz de la Experiencia del Plan Hidrológico de California". *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 37:183-204.

Saurí, D.; López, A.; Galán, J.M.; Capellades, M.; Rivera, M. (2003). "Aproximación a la Demanda Doméstica de Agua Mediante Modelos Multiagente. El Caso de la Región Metropolitana de Barcelona". *Ingeniería Civil*, 131:147-151.

SHELL (2003). *Scenarios: An Explorer's Guide*. London:Global Business Environment Shell International.

Turner, A.; White, S. (2003) *ACT Water Strategy: Preliminary Demand Management and Least Cost Planning Assessment*. Institute for Sustainable Futures for ACTEW Corporation.

White, S.; Robinson, J.; Cordell, D.; Jha, M.; Milne, G. (2003). "Urban Water Demand Forecasting and Demand Management: Research Needs Review and Recommendations". *Water Services Association of Australia Occasional Paper 9*.

Young, H.P. (1999). "Diffusion in Social Networks". *CSED Working Paper N°*